Arh Hig Rada Toksikol 2000;51 Supplement: 103–114

RADIOAKTIVNOST U BIOSFERI I U PROFESIONALNOJ IZLOŽENOSTI U NAS

ZDENKO FRANIĆ, GORDANA MAROVIĆ, NEVENKA LOKOBAUER I IVICA PRLIĆ

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

Primljeno studeni 1999.

U radu su prikazani rezultati sustavnog istraživanja radioaktivnosti životne i radne sredine u Republici Hrvatskoj od početka šezdesetih godina. Istraživana je radioaktivnost zraka, oborina, tla, rijeka, mora i jezera, pitke vode te ljudske i stočne hrane, kao i vanjska izloženost za radnike profesionalno izložene ionizirajućem zračenju. Maksimalna radioaktivna kontaminacija fisijskim radionuklidima zabilježena je ranih šezdesetih godina, u vrijeme najintenzivnijih atmosferskih nuklearnih pokusa. Od tada radioaktivnost radioaktivnih oborina eksponencijalno opada. Nuklearna nesreća u Černobilju dovela je u Republici Hrvatskoj do ponovnog povećanja radioaktivnosti ^{137}Cs u okolišu, dok je povećanje radioaktivnosti ^{90}Sr, zbog njegove manje hlapljivosti, bilo neznatno. No, nakon tog kratkotrajnog povećanja ponovno je došlo do eksponencijalnog pada radioaktivnosti, tako da je godine 1998. prosječna brzina apsorbirane doze u zraku iznosila 0,128±0,004 μGy/h. Prosječan pripadnik hrvatske populacije je stoga zbog izloženosti osnovnom zračenju na godišnjoj razini primio dozu od oko 1,12±0,04 mSv. Ukupna kolektivna doza uključuje i dozu uzrokovanu primjenom izvora ionizirajućih zračenja u medicini te je značajan naglasak stavljen na kontrolu kakvoće izvora zračenja (koja se sustavno provodi od 1985) kako bi se smanjila ukupna kolektivna doza koju primi hrvatsko pučanstvo.

Ključne riječi:
Černobilj, doza, dozimetrija, ionizirajuće zračenje, radioaktivnost okoliša, radioaktivne oborine, zaštita od zračenja

Pojava ionizirajućeg zračenja u obliku brzih čestica ili fotona visokih energija, što nastaje pri raspadanju nestabilnih atomskih jezgara, tj. radionuklida naziva se *radioaktivnost*. No, isti se termin rabi i za svojstvo tvari, odnosno sredstva u kojima se takve pojave događaju. Ionizirajuće zračenje (često pogrešno nazivano i radioaktivno zračenje) jest zračenje koje ima sposobnost ionizacije molekula neke tvari. Ionizirajuće zračenje ozračenoj tvari predaje energiju zbog čega se mijenjaju svojstva i zračenja i ozračene tvari. U živoj tvari ionizirajuće

zračenje izaziva snažno biološko djelovanje jer uništava žive stanice. To pak djelovanje može biti izravno na atome koji izgrađuju molekule žive tvari ili posredno djelovanje na atome okolnog sustava, većinom vode. Ukupni učinci ionizirajućeg zračenja na žive jedinke dijele se na somatske i genetske. Posljedice somatskog učinka u ljudi mogu biti (ovisno o dozi) poremećenje krvne slike, oštećenje kože te dugoročne posljedice kao, što su leukemija, razne vrste malignih bolesti, smanjenje plodnosti te naposljetku skraćenje života. Učinak visokih doza na čovjeka ovisi o ritmu ozračivanja, odnosno je li ozračivanje trajalo kratko ili dugo, je li bilo višekratno ili jednokratno. Za neke učinke, npr. izazivanje leukemije, i uz male se doze tkivo ne oporavlja već se doze nakupljaju. Posljedice genetskih učinaka na potomstvo obuhvaćaju oštećenja rasplodnih stanica i mutaciju gena.

Učinci zračenja na žive organizme dijele se prema pogibeljnosti na nestohastičke i stohastičke (slučajne). Nestohastički učinci pojavljuju se samo ako je primljena dostatno visoka doza i za njih postoji prag, odnosno minimalna doza ispod koje se takvi učinci ne pojavljuju. Stoga se za nestohastičke učinke može propisati sigurnosna granica. Nestohastički učinci jesu nemaligne ozljede kože, smanjenje broja stanica u koštanoj srži, zamućenje očne leće itd.

Stohastički su učinci statistički izvjesni, ali im je razdioba slučajna. Njihova vjerojatnost pojavljivanja proporcionalna je dozi *bez praga*, tj. ne postoji neka minimalna doza ispod koje se takvi učinci (efekti) ne pojavljuju. Takvi su učinci primjerice genetska oštećenja i pojava raka, uvijek su zakasnjeli godinama, pa i desecima godina. Vjerojatnost da se takvi učinci pojave izražava se kao rizik koji je proporcionalan primljenoj dozi.

Doza je pak »mjera« zračenja koje je primila, odnosno apsorbirala neka meta. Dozimetrijske veličine u užem smislu obuhvaćaju one fizičke veličine koje opisuju međudjelovanje zračenja i tvari, a u širem smislu tu se ubrajaju i one veličine koje karakteriziraju upadni snop zračenja (npr. broj čestica i energiju koju one prenose). Dozimetrijske veličine izvode se iz energije te je doza proporcionalna koncentraciji radioaktivnosti neke tvari. Stoga je za proračunavanje doza, odnosno rizika od ionizirajućeg zračenja potrebno poznavati koncentracije aktivnosti. Mjerenja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj provode se u Jedinici za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada još od 1959. godine (1–4). Pri tome se u Jedinici za zaštitu od zračenja sustavno istražuje radioaktivnost zraka, oborina, tla, rijeka, mora i jezera, pitke vode te ljudske i stočne hrane. Osobita je pažnja posvećena biološki najvažnijim radionuklidima, tj. ^{90}Sr i ^{137}Cs koji nakon unošenja u organizam slijede metaboličke putove kalcija, odnosno kalija. Osim radioaktivnosti fisijskih produkata, istraživana je i prirodna radioaktivnost te tehnološkim postupcima povišena prirodna radioaktivnost (odlagališta pepela i šljake, fosfogipsa, naftne bušotine, termalni i geotermalni izvori itd.). Posebna je pažnja posvećena istraživanju koncentracija radona u zraku unutar prostorija, budući da je radon s obzirom na ljudsku izloženost najvažniji od svih izvora prirodnog zračenja.

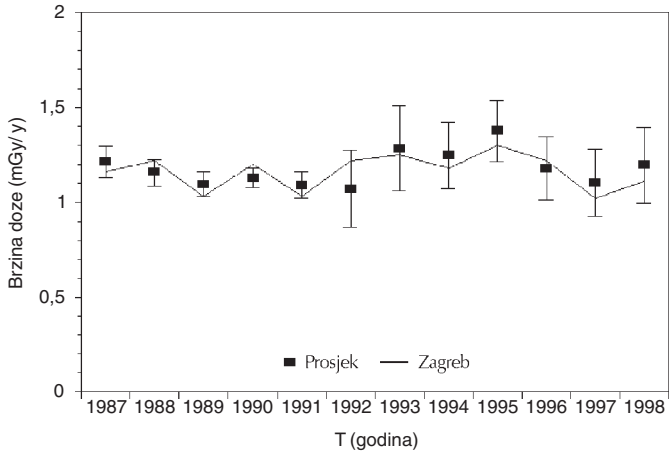
Za radnike profesionalno izložene ionizirajućem zračenju u medicini, industriji i obrtništvu u Jedinici za dozimetriju i radiobiologiju provodi se monitoring vanjske izloženosti.

REZULTATI I RASPRAVA

Brzina doze u okolišu

Čovjek je oduvijek bio izložen kozmičkom zračenju i okružen prirodnim radioaktivnim tvarima. No, čovjekova intervencija u prirodu godine 1945. eksplozijom prve nuklearne

bombe rezultirala je radioaktivnom kontaminacijom biosfere radionuklidima koji nastaju procesom nuklearne fisije (fisijski produkti). Oslobađanje radionuklida u okoliš, pa i ionizirajuće zračenje neizbježna je popratna pojava i mnogih tehnoloških procesa (primjerice rad nuklearnih elektrana). Prosječna je godišnja doza mjerena TL dozimetrima na lokaciji Instituta (45° 50' 7" N, 15° 59' 1" E) za razdoblje od 1987. do 1998. godine iznosila 1,26±0,09 mSv. U istom razdoblju prosječna doza u Hrvatskoj (prosjek od šezdesetak mjernih lokacija) kretala se od minimalnih 1,07 mSv godine 1992. do 1,38 mSv izmjerenih godine 1995. (slika 1). Takva kolebanja u vrijednostima doze mogu se objasniti raznolikošću fizikalnih čimbenika u okolišu koji prirodno, odnosno sami po sebi fluktuiraju. Za usporedbu, godine 1998. prosječna brzina apsorbirane doze u zraku u Republici Hrvatskoj iznosila je 0,14±0,02 μGy/h, što na godišnjoj razini daje dozu od 1,2±0,2 mGy.



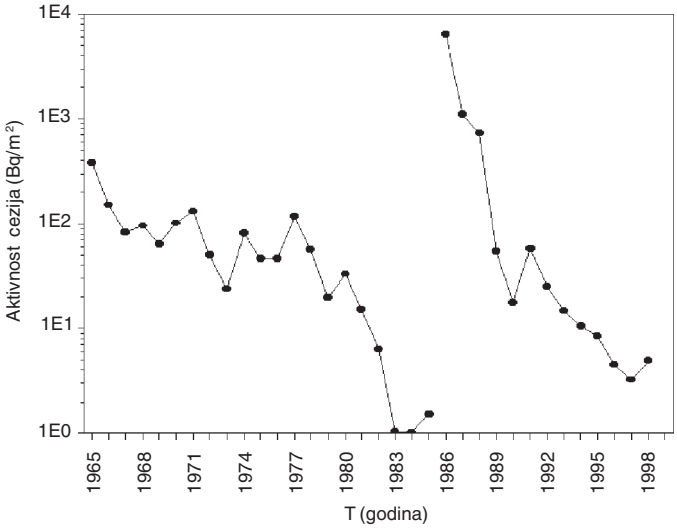
Slika 1 *Godišnja apsorbirana doza u zraku proračunana na temelju rezultata mjerenja provedenih termoluminiscentnim dozimetrima*

Radioaktivne oborine

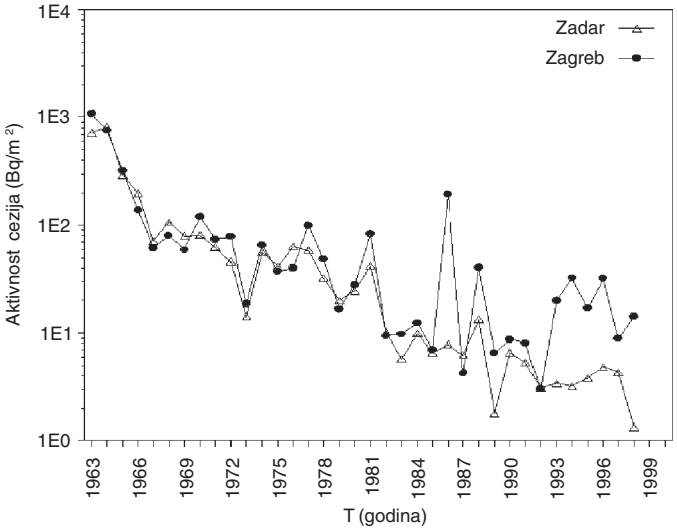
Radionuklidi stvoreni nuklearnim eksplozijama u atmosferi, osobito intenzivno provođenim 1960.-ih godina, još su i danas prisutni u atmosferi. Taj se radioaktivni materijal taloži na površinu Zemlje u obliku tzv. radioaktivnih oborina (engl. *fallout*). Posljedično, kontaminacija okoliša fisijskim produktima u Republici Hrvatskoj posljedica je atmosferskih nuklearnih pokusa ali i nuklearne nesreće u Černobilju godine 1986. Dugoročna ispitivanja depozicije ^{137}Cs u Hrvatskoj (slika 2) pokazuju da je ukupna depozicija ^{137}Cs poslije černobiljske nesreće nadmašila vrijednosti zabilježene sredinom 1960.-ih godina. Depozicija ^{137}Cs od 5,8 kBq/m^2 izmjerena 1986. godine približno je 4000 puta veća negoli prethodne godine te približno 1200 puta veća nego godine 1998.

Suprotno negoli u slučaju ^{137}Cs, černobiljska nesreća nije u Hrvatskoj prouzročila značajnije povećanje koncentracije aktivnosti ^{90}Sr u većini uzoraka iz okoliša. Za razliku

od atmosferskih pokusa nuklearnog oružja, radionuklidi podrijetlom iz čornobiljske nesreće nisu se izravno oslobodili u atmosferu. Zbog samog mehanizma ispuštanja (produženo ispuštanje pod utjecajem požara) i prevladavajućih meteoroloških prilika manje hlapljivi radioaktivni materijal (primjerice ^{90}Sr) nataložili su se bliže samom mjestu nesreće od hlapljivijih komponenata. Stoga je ^{90}Sr samo u manjim količinama bio

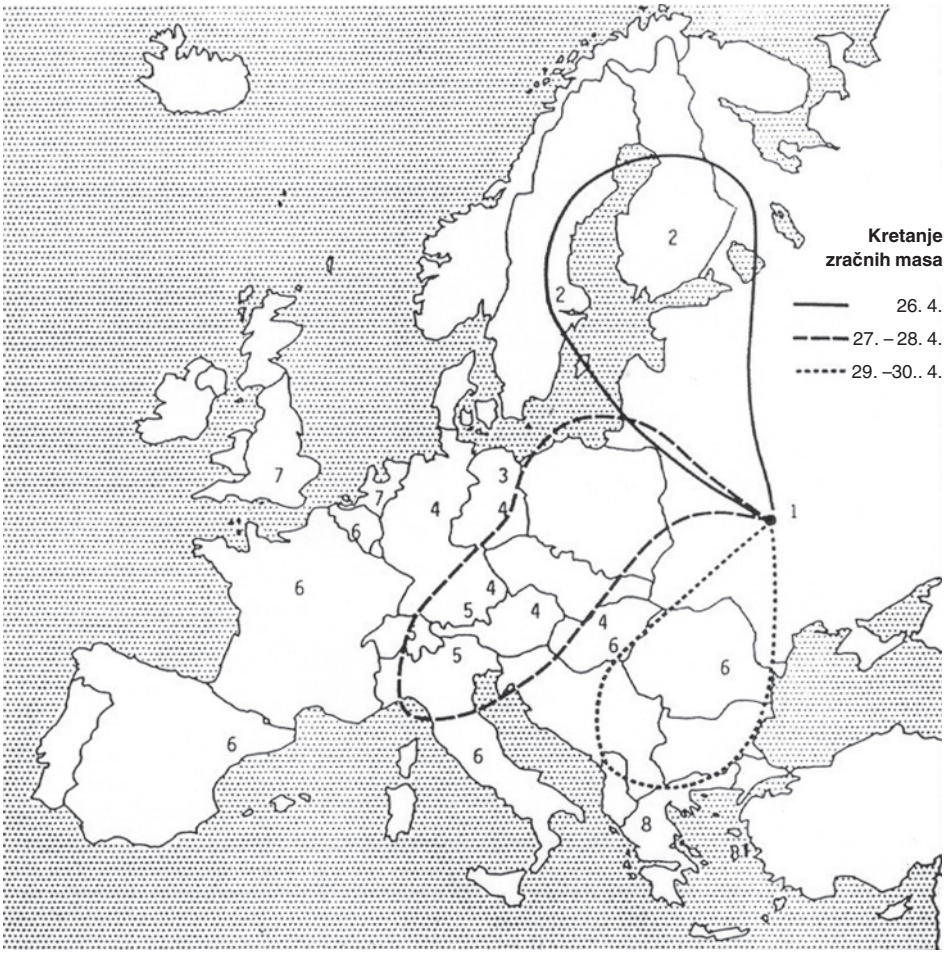


Slika 2. *Aktivnost ^{137}Cs u radioaktivnim oborinama u Zagrebu*



Slika 3. *Aktivnost ^{90}Sr u radioaktivnim oborinama u Zagrebu i Zadru*

podvrgnut globalnim disperzijskim procesima te se nataložio na površinu Zemlje u vremenu od nekoliko dana do nekoliko tjedana nakon nesreće. Na slici 3. prikazana je depozicija ^{90}Sr radioaktivnim oborinama u gradovima Zagrebu i Zadru u periodu od 1963. do 1999. godine. Za razliku od Zagreba, u kojem je u svibnju 1986. godine izmjerena deponirana aktivnost od 191 Bq/m^2, u Zadru nije zabilježen porast aktivnosti ^{90}Sr. To je u skladu s činjenicom da središnja Hrvatska, pa tako ni dalmatinska obala nije bila zahvaćena nijednom od perjanica radioaktivnog materijala nošenog iz černobiljskog reaktora (5, 6), kako je prikazano na slici 4. U kolovozu 1986. ta se vrijednost



Slika 4. *Kretanje radioaktivnog oblaka nakon nuklearne nesreće u Černobilju. Brojevi 1–8 predstavljaju vrijeme dolaska oblaka u pojedino područje: 1 – 26. travnja, 2 – 27. travnja, 3 – 28. travnja, 4 – 29. travnja, 5 – 30. travnja, 6 – 1. svibanj , 7 – 2. svibnja i 8 – 3. svibnja.*

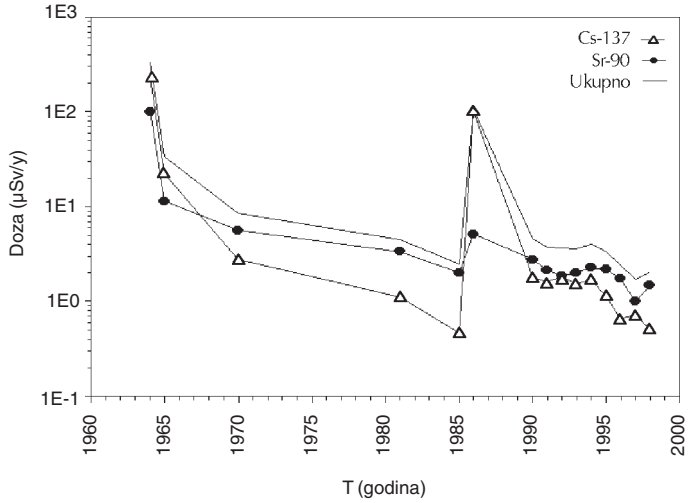
Napomena: Kako je slika preuzeta iz izvješća UNSCEAR-a za 1988. godinu (5), karta Europe odražava tadašnju geopolitičku realnost

u Zagrebu smanjila na 1,8 Bq/m^2, a u studenome na samo 0,1 Bq/m^2, tako da je ukupna godišnja depozicija ^{90}Sr godine 1986. u Zagrebu iznosila tek oko 193 Bq/m^2 (7). Očekivano, korelacija između depozicije ^{90}Sr u Zagrebu i Zadru vrlo je dobra te koeficijent korelacije iznosi 0,95 za 36 opažanja. Osim ^{137}Cs i ^{90}Sr, u svibnju 1986. značajni radionuklidi bili su još ^{134}Cs i ^{131}I. Na zagrebačkom području za depoziciju ^{134}Cs izmjerena je vrijednost od 31 kBq/m^2 te također ista vrijednost za ^{131}I (2, 8).

Za radionuklide je potrebno oko 7 vremena poluraspada ($T_{1/2}$) da njihove koncentracije padnu na zanemarive vrijednosti. Posljedično, nakon čornobiljske nesreće ^{131}I koji ima vrijeme poluraspada od svega 8,06 dana bio je u okolišu prisutan oko dva mjeseca, dok se ^{134}Cs (vrijeme poluraspada 2,06 godine) u uzorcima iz okoliša još mogao detektirati i sredinom 1990.-ih godina. Valja naglasiti da zbog mehanizma nastanka (dugotrajno ozračivanje nuklearnog goriva) ^{134}Cs nije bio prisutan u atmosferi nakon atmosferskih pokusa nuklearnog oružja budući da se nuklearne eksplozije zbivaju u djeliću milisekunde. Stoga je prisutnost ^{134}Cs u okolišu ujedno i indikator uzroka radioaktivne kontaminacije (havarija nuklearnog reaktora ili pokusi nuklearnog oružja).

Prehrambeni lanac

Procjena godišnje efektivne doze koju primi hrvatsko pučanstvo zbog unosa ^{137}Cs i ^{90}Sr načinjena je na osnovi podataka vezanih uz kontaminaciju najvažnijih prehrambenih komponenata (9). Godišnja efektivna doza za odraslog pripadnika hrvatskog pučanstva zbog unosa ^{137}Cs i ^{90}Sr prehranom prikazana je na slici 5. Dozni konverzijski faktori (doza po jediničnom unosu) pri proračunima iznose 1,3x10^{-8} Sv/Bq za ^{137}Cs i 2,8x10^{-8}



Slika 5. *Godišnja efektivna doza zbog unosa ^{137}Cs i ^{90}Sr prehranom*

Sv/Bq za ^{90}Sr (10). Vidljivo je da su doze šezdesetih godina bile znatno više nego godine 1986. poslije černobiljske nesreće. Tako je godine 1964. ukupna doza od unosa ^{90}Sr i ^{137}Cs iznosila 333 μSv, što je oko 3 puta više od doze za 1986. godinu koja je iznosila 106 μSv. Godine 1998. doza iznosi svega 2,0 μSv, što je manje i od predčornobiljske 1985. godine za koju je procijenjena doza od 2,5 μSv.

Pri kontroli prehrambenih namirnica osobita je pažnja posvećena mlijeku kao osjetljivu indikatoru s pomoću kojeg se može otkriti prisutnost fisijskih produkata u okolišu. Osim toga, mlijeko je i važna prehrambena namirnica, osobito za djecu kao najosjetljiviju populacijsku grupu glede izlaganja zračenju. Kolektivna efektivna doza zbog ingestije izotopa cezija konzumacijom mlijeka procijenjena je na 205 čovjek Sv u godini 1986. i manje od 1 čovjek Sv u godini 1998. (11). Glede radioaktivne kontaminacije prehrambenih namirnica valja napomenuti da izotope cezija osobito nakupljaju neke jestive gljive kao, što je primjerice ciganček (*Rozites capareta*). Tako bi godine 1990. konzumacija 1 kg cigančeka rezultirala dozom od oko 12 μSv (12).

Što se tiče stroncija u okolišu, jedini uzorci u kojima su se u dužem vremenu mogle pratiti povišene koncentracije ^{90}Sr podrijetlom od černobiljske nesreće, bili su uzorci cisternskih voda (13). Naime, nekoliko mjeseci nakon nesreće, kada se glavnina černobiljskog fallouta slegla na zemlju, bilo je potrebno isprazniti cisterne i potom ih dobro isprati, što većina korisnika nije učinila.

Pitke i termalne vode

Zdrava pitka voda jedan je od prvih preduvjeta za normalan život i nesmetan napredak svakoga društva. Zbog sveprisutnosti, voda je podložna raznim onečišćenjima, pa tako i mogućoj radioaktivnoj kontaminaciji fisijskim i prirodnim radionuklidima. Od prirodnih radionuklida najvažniji je ^{226}Ra (14), kao radionuklid izuzetno velike radiotoksičnosti i s dugim vremenom poluraspada (1600 god.). Kako se u većini zemalja pitka voda u velikim gradovima crpi iz uređenih izvora (površinskih ili podzemnih), pri čemu se obično primjenjuju metode uklanjanja eventualne radioaktivne kontaminacije prije nego, što voda dođe do krajnjeg potrošača, unos radionuklida u organizam relativno je malen, što pak rezultira i malom kolektivnom dozom. Prosječna vrijednost koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u vodovodnoj vodi iz gradskih vodovoda u Republici Hrvatskoj za period 1992.–1997. iznosila je $2,1 \pm 1,4$ Bq/m^3, što je manje i od najniže aktivnosti izmjerene u bunarskim vodama. Naime, koncentracije ^{226}Ra u bunarskim vodama mogu biti znatno veće od onih u vodovodnim vodama. Tako je prosječna vrijednost koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u bunarskoj vodi skupljanoj na nekoliko lokacija sjeverozapadne Hrvatske u periodu od 1986. do 1996. godine iznosila 34 ± 12 Bq/m^3 (15). Posljedično, godišnja efektivna doza koju bi pojedinac primio konzumiranjem 2 L vode na dan iznosi 0,2 μSv za vodovodnu vodu i 5,4 μSv za bunarsku vodu (15).

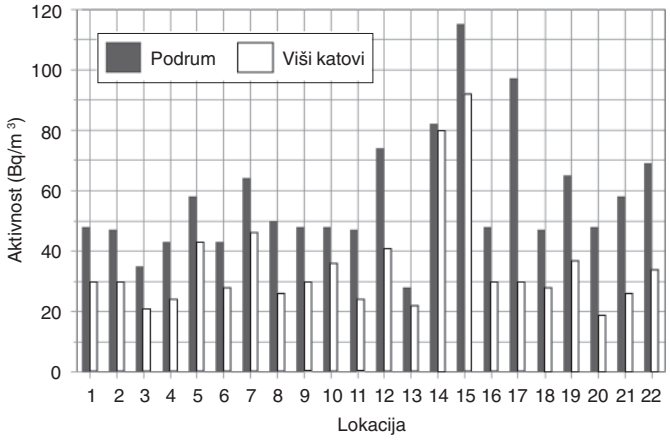
Glede fisijskih radionuklida u pitkim vodama, koncentracija aktivnosti ^{137}Cs godine 1998. bila je ispod granice detekcije instrumenta, odnosno 5,16 Bq/m^3, dok je koncentracija aktivnosti ^{90}Sr iznosila $4,2 \pm 2,4$ Bq/m^3 (4).

Kako je Hrvatska bogata izvorima podzemnih voda (termalne, geotermalne i mineralne), raspon njihove uporabe vrlo je širok (piće, rekreacija, terapija itd.). Stoga je sustavno istraživana prirodna radioaktivnost takvih voda, osobito zato što pojedine vode sadrže koncentracije daleko iznad onih zakonom dopuštenih za pitke vode. Tako se koncentracija ^{226}Ra u mineralnim izvorskim vodama kreće od 0,1 Bq/L (Jamnica) do 0,3 Bq/L (Lipik), a u termalnim vodama od 0,6 Bq/L (Stubičke toplice) do 4,5 Bq/L (Bizovačke toplice) (16, 17).

Radon

Saznanje da udisanje radona i njegovih kratkoživućih potomaka daje polovinu godišnje doze koju pojedinac prima iz svih prirodnih izvora zajedno razlog je proučavanja povećanog izlaganja stanovništva radonu i njegovim potomcima u zatvorenim prostorijama. Budući da radon potječe uglavnom iz tla ili građevnog materijala, radiološka situacija u zatvorenim prostorijama je, u najvećem broju slučajeva, nepovoljnija od one na otvorenom prostoru. Pored toga, stanovništvo koje živi u gradovima veći dio svoga vremena (oko 80%) provodi u zatvorenim prostorijama. Iz tih razloga u urbanim sredinama dolazi do povećane inhalacije radona i njegovih potomaka koji se unose u pluća te mogu uzrokovati niz štetnih posljedica za zdravlje.

U istraživanjima provedenim godine 1997. u gradu Zagrebu (18) procijenjena je izloženost radonu stanovništva koje živi u podrumskim stanovima i stanovima na višim katovima. Na slici 6. prikazane su prosječne godišnje specifične aktivnosti radona u podrumskim stanovima i stanovima na višim aktovima. Prosječne aktivnosti za promatrane 22 lokacije jesu 57 ± 20 Bq/m^3 za podrumske stanove i 35 ± 18 Bq/m^3 za stanove na višim katovima. To govori da stanovnici koji žive na višim katovima primaju oko 40% manju dozu zračenja od inhalacije radona od stanovnika koji žive u podrumskim stanovima. Odgovarajuće doze iznose 1,4 mSv/y za podrumske stanove i 0,9 mSv/y za stanove na višim katovima, uz pretpostavku da se 80% vremena provodi unutar tih stanova.



Slika 6. *Prosječna godišnja specifična aktivnost radona u podrumskim stanovima i stanovima na višim katovima*

Valja napomenuti da se prema preporukama Komisije za radiološku zaštitu dopuštene aktivnosti radona u stambenim prostorima kreću se od 200 do 600 Bq/m^3, a u radnim prostorima od 500 do 1500 Bq/m^3 (19). Tzv. nivo akcije, pod kojim se podrazumijeva ona aktivnost radona pri kojoj je potrebno poduzeti određene mjere koje će

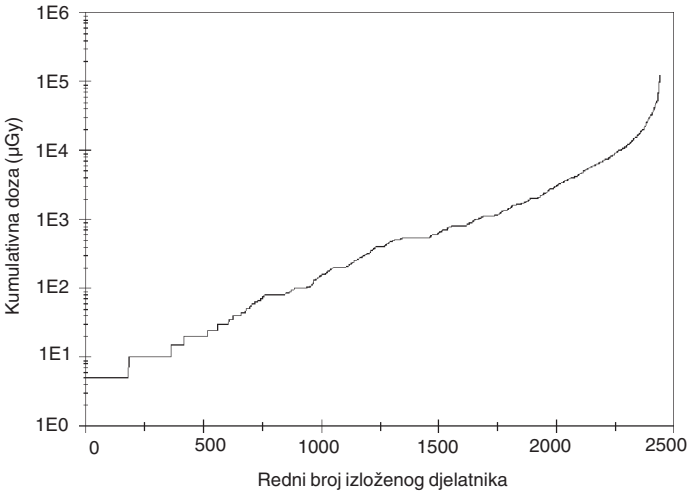
rezultirati smanjenjem aktivnosti radona prema preporukama Komisije iznosi za postojeću situaciju 200 Bq/m^3 radona. Svaka zemlja trebala bi se, na osnovi svojih mjerenja, odlučiti za optimalne »nivoe akcije« (20).

Profesionalna izloženost

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, kao ovlaštena ustanova Ministarstva zdravstva Republike Hrvatske za obavljanje poslova zaštite od zračenja trideset godina skuplja bazu podataka o profesionalnoj izloženosti vanjskom zračenju djelatnika koji rade s izvorima i uz izvore ionizirajućeg zračenja.

Kako bi se procijenila prosječna efektivna doza zračenja koja opterećuje profesionalne djelatnike, promatrano je ukupno 7536 djelatnika u vremenu od 1. lipnja 1990. do 1. travnja 1999. godine, koji su najmanje jedan mjesec (kontrolni interval) proveli pod dozimetrijskim nadzorom IMI-a (21, 22). Struktura kontroliranih djelatnika je ova: 75% radi u medicini, 20% u industriji te 5% u ostalim djelatnostima (znanost, državne i javne službe itd.). Kod 5094 djelatnika na njihovim dozimetrima (film, TLD) nikada nije zabilježena »profesionalna« doza, odnosno ona doza koja je iznad osnovnog zračenja i praga osjetljivosti primijenjenog dozimetra.

Na slici 7. prikazane su kumulativne doze za preostala 2442 profesionalno izložena djelatnika koji su najmanje u jednom kontrolnom intervalu primili »profesionalnu« dozu, odnosno dozu koja je iznad osnovnog zračenja i razine osjetljivosti primijenjenog dozimetra (23).



Slika 7. *Individualne kumulativne doze, poredane po rastućim dozama, za 2442 profesionalno izložena djelatnika u Republici Hrvatskoj koji se nalaze i koji su se nalazili pod dozimetrijskim nadzorom Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI-a) za razdoblje od 1. lipnja 1990. do 1. travnja 1999. i koji su najmanje u jednom kontrolnom intervalu primili »profesionalnu« dozu. Ukupan broj nadziranih djelatnika iznosio je 7536. (Baza podataka IMI-a)*

Učestalost primanja doze za pojedinog djelatnika za ovaj prikaz nije relevantna, budući da je cilj bio prikazati kumulativnu izloženost grupacije. Kako integral kumulativnih doza iznosi 6,8 Gy, *per capita doza* u grupi od 2442 profesionalno izložena djelatnika iznosi oko 2,7 mGy, što je dodatak na osnovnu dozu za te ljude.

Valja napomenuti da postoji grupacija djelatnika koja je izložena određenim povišenim razinama ionizirajućeg zračenja, a prema pozitivnim zakonskim propisima o zaštiti od zračenja (10, 24) ne pripadaju u grupu obvezno nadziranih profesionalnih djelatnika. Posljedično, ne nalaze se pod dozimetrijskim nadzorom. U tu grupu primjerice pripadaju osobe izložene tehnološkim postupcima povišenim razinama ionizirajućeg zračenja (industrija umjetnih gnojiva, posada zrakoplova, rudari, neke djelatnosti u medicini, znanstvenim istraživanjima i sl.).

ZAKLJUČNE NAPOMENE

Iako je percepcija javnosti u Republici Hrvatskoj drugačija, razine izloženosti ionizirajućem zračenju podrijetlom od fisijskih, prirodnih izvora, kao ni razine izloženosti djelatnika koji rade s izvorima i uz izvore ionizirajućeg zračenja nisu velike. Valja napomenuti da u ovome radu nisu prikazane niti obrađene doze kojima je pučanstvo Hrvatske opterećeno prilikom dijagnostičkih, intervencijskih i terapijskih radioloških postupaka.

Nuklearna nesreća u Černobilju nije prouzročila značajniju kontaminaciju okoliša u Republici Hrvatskoj. No, kako i danas, više od 13 godina nakon nesreće neki uzorci iz okoliša sadržavaju značajnu rezidualnu radioaktivnost fisijskih radionuklida podrijetlom iz černobiljskog reaktora, s radioekološkog aspekta černobiljska nesreća skreće posebnu pozornost na osjetljivost nekih odjeljka biosfere.

Najveći dio doze koju pučanstvo primi od svih prirodnih izvora može se pripisati inhalaciji radona i radonovih potomaka. Koncentracije radona u okolišu, a posebno u zatvorenim prostorima ovise o nizu čimbenika, najviše o geološkom sastavu tla. Stoga je nužno potrebno provesti istraživanja radona na području cijele zemlje da bi se načinila «radonska karta» Hrvatske te detektirala područja na kojima je izloženost radonu povišena. Na temelju takvih istraživanja potom se provode mjere zaštite, odnosno sniženja koncentracije radona.

LITERATURA

1. Državni sekretarijat za poslove narodne odbrane SFRJ. Radioaktivnost životne sredine u Jugoslaviji 1959.–1977. Beograd: Državni sekretarijat; Izvješća 1960.–1978.
2. Bauman A, Cesar D, Franić Z, Kovač J, Lokobauer N, Marović G i sur. Rezultati mjerenja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj1978.–1992. Zagreb: Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada; Izvješća 1979.–1993.
3. Kovač J, Cesar D, Franić Z, Lokobauer N, Marović G, Maračić M. Rezultati mjerenja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj 1993.–1997. Zagreb: Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada; Izvješća 1994.–1998.

4. Marović G, Franić Z, Kovač J, Lokobauer N, Marović G, Maračić M. Rezultati mjerenja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj 1998. Zagreb: Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada; Izvješće 1999.
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation. New York (NY): United Nations; 1988.
6. Franić Z, Bauman A. Activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Adriatic Sea. Health Physics 1993;64:162–9.
7. Franić Z. Distribution analysis and mean residence time of ^{90}Sr in wet fallout in Zagreb. Hrvatski meteorološki časopis 1994;29:25–30.
8. Šarić M, Blanuša M, Drevenkar V, Franić Z, Fugaš M, Krauthacker B, Lokobauer N, Vajdička N. Environmental exposure assessment and health effect studies in the Republic of Croatia (1980–1995). Zagreb: Croatian Academy of Sciences and Arts; 1996.
9. Lokobauer N, Franić Z, Bauman A, Maračić M, Cesar D, Senčar J. Radiation contamination after the Chernobyl nuclear accident and the effective dose received by the population of Croatia. J Environ Radioactivity 1998;41:137–46.
10. International Atomic Energy Agency (IAEA). International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Safety Series No. 115. Vienna: IAEA; 1996.
11. Franić Z, Marović G, Lokobauer N, Senčar J. Radiocaesium activity concentrations in milk in the Republic of Croatia. Environ Monit Assess 1998;51:695–704.
12. Franić Z, Senčar J, Bauman A. Caesium Radioactivity in Mushrooms in Northwest Croatia. Period Biol 1992;94:115–120.
13. Franić Z, Lokobauer N, Marović G. Radioactive contamination of cistern waters along the Croatian coast of the Adriatic sea by ^{90}Sr. Health Physics 1999;77:62–6.
14. Marović G, Senčar J, Bauman A. ^{226}Ra in drinking water in the Republic of Croatia. Arh Hig Rada Toksikol 1994;45:151–9.
15. Marović G, Senčar J, Franić Z. ^{226}Ra in tap and mineral water and related health risk in the Republic of Croatia. Environ Monit Assess 1997;46.23–9.
16. Marović G, Senčar J, Cesar D. Prirodna radioaktivnost termalnih izvora u Hrvatskoj. U: Obelić B, Franić Z, ur. Zbornik radova Četvrtog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 11.–13. studenog 1998; Zagreb. Zagreb: Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja; 1998. str. 207–14.
17. Marović G, Senčar J, Franić Z, Lokobauer N. Radium-226 in thermal and mineral springs of Croatia and associated health risk. J Environ Radioactivity 1996;33:309–17.
18. Lokobauer N, Franić Z. Pilot projekt određivanja radona u gradu Zagrebu. Zagreb: Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada; 1997. Agencija za posebni otpad.
19. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation. ICRP Publication 39. Oxford: Pergamon Press; 1983.
20. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Oxford: Pergamon Press; 1993.
21. Momčilović B, Prlić I, Radalj Ž. »Who Got it?« – The educational profile of manpower occupationally overexposed to the ionizing radiation in the Republic of Croatia [sažetak]. U: Book of abstracts of the IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe; 22–27 Aug 1999; Budimpešta, Mađarska. Budimpešta: IRPA; 1999. str. 217.
22. International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60. Oxford: Pergamon Press; 1990.

23. Prlić I, Momčilović B, Radalj Ž. »Why Me?« – The compliance of the occupationally exposed health care workers with the mandatory dosimetry control of the radiation risk in the Republic of Croatia. ŠsažetakĆ. U: Book of abstracts of the IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe; 22–27 Aug 1999; Budimpešta, Mađarska. Budimpešta: IRPA; 1999. str. 216.
24. Zakon o zaštiti od ionizirajućih zračenja. Narodne novine 1999;(27):813–20.

Summary

RADIOACTIVITY IN BIOSPHERE AND OCCUPATIONAL EXPOSURE IN CROATIA

This paper presents results of long-term investigations of radioactivity in general and occupational environments in the Republic of Croatia. Investigations of environmental radioactivity and occupational exposure monitoring in Croatia have been systematic since the early sixties. Investigations included radioactivity of the air, fallout, soil, river, sea and lake water, tap water, human foodstuffs, and animal feed. External dosimetry monitoring is carried out for workers occupationally exposed to ionising radiation in medicine, and industry.

Radioactive contamination with fission radionuclides is associated with deposition of fallout originating from atmospheric explosions of nuclear weapons as well as from regular operation of nuclear facilities. Among hundreds of different radionuclides contained in various types of fallout only a few significantly contribute to the dose, particularly ^{90}Sr and ^{137}Cs. The maximum radioactive contamination with fission radionuclides was recorded in the early sixties, at the time of most intensive atmospheric nuclear tests. The fallout radioactivity has been exponentially decreasing ever since.

The nuclear accident at Chornobyl temporarily raised ^{137}Cs radioactivity levels in Croatia, whereas the increase in ^{90}Sr radioactivity was not significant due to its low volatility. After a short-term increase, radioactivity dropped back to the pre-Chornobyl levels. Apart from radioactivity of fission products, investigations involved natural radioactivity and technologically enhanced natural radioactivity. Particular attention has been paid to radon as the most relevant source of natural radiation for humans.

In 1998, the average absorbed dose in the air was 0.128±0.004 μGy/h. Consequently, an average Croat received the annual dose of 1.12±0.04 mSv through exposure to background radiation. However, as the overall collective dose includes the dose received by medical and civil use of radiation sources, significant effort has been put on the quality control of radiation sources (systematically implemented since 1985) as an important step for reducing the overall collective dose of Croatian population.

Key words:
Chornobyl, dose, dosimetry, environmental radioactivity, fallout, ionising radiation, radiation protection

Requests for reprints:

dr. sc. Zdenko Franić, dipl. ing. fizike
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada
p.p. 291, 10001 Zagreb
E-mail: *Zdenko.Franic@imi.hr*